

Development of Shielding Analysis System for the Reactor Vessel by R- θ Coordinate Geometry

Ha Yong Kim · Bon Seung Koo · Kyo Youn Kim · Chung Chan Lee
and Sung Quun Zee

Korea Atomic Energy Research Institute

R- θ 좌표계에 의한 원자로 압력용기 차폐해석체계 개발

김하용 · 구본승 · 김교윤 · 이정찬 · 지성균

한국원자력연구소

(2004년 11월 5일 접수, 2005년 2월 2일 채택)

Abstract - A new developing reactor isn't fixed the structure and the materials of reactor components. To perform the shielding analysis for a reactor vessel by R- θ geometry, it takes much effort and time to modeling of source term according to the change of reactor components every time. Therefore, we developed the shielding analysis system for the reactor vessel by R- θ geometry, which wasn't affected by the reactor core geometry. By using the developed shielding analysis system, we performed the shielding analysis for the reactor vessel of an integral reactor which has the hexagonal geometry of nuclear fuel assemblies in reactor core. We compared the results obtained from the developed system with those obtained from MCNP analysis. Because the results of developed shielding analysis system were more conservative than those of MCNP calculation, it is useful for shielding analysis. As we had developed the new shielding analysis system for a reactor vessel by R- θ geometry, we reduced error of model for reactor core which was formerly designed by hand and saved the time and the effort to design source term model of reactor core.

Key words : *Shielding Analysis, Reactor Vessel, R- θ , integral reactor, HELIOS, MASTER, MCNP*

요약 - 노심 및 원자로의 구조 및 구성 물질이 확정되어 있지 않은 개발단계의 신형원자로의 압력용기에 대한 R- θ 좌표에서 차폐해석을 수행하려면, 매번 선원항에 대한 모델작업을 하는데 많은 노력과 시간이 소요된다. 따라서 R- θ 좌표에 의한 반경방향의 원자로 압력용기에 대한 차폐해석에 있어서 노심의 기하학적 구조에 영향을 받지 않고 해석할 수 있는 체계를 개발하였다. 개발된 해석체계를 이용하여 육방형 노심배열을 갖는 일체형 원자로의 압력용기에 대한 차폐해석을 수행하여, 그 결과를 MCNP 해석결과와 비교 분석 하였다. 분석결과 개발된 해석체계가 좀 더 보수적인 결과를 나타내었으며 이는 차폐해석측면에서 타당하다. 또한 이 해석체계를 개발함으로써 그동안 수작업으로 작성하였던 노심내부에 대한 모델에 대한 오차를 줄일 수 있으며 이에 소요되는 시간 및 노력을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

중심어 : 차폐해석, 압력용기, R- θ , 일체형원자로, HELIOS, MASTER, MCNP

서 론

최근에 신형원자로에 대한 연구가 활발히 진행되면서 정방형 격자노심에서 벗어나 다양한 기하

학적 구조의 노심을 갖는 원자로가 개발되고 있다. 일반적으로 원자로의 반경방향 압력용기 중성자 조사량 평가를 위해서는 2차원 각분할법에 의한 수송방정식의 해를 구하는 DORT[1]코드를 사용하여

차폐해석을 수행한다. 하지만 대부분의 원자로에서 원통형 구조를 갖는 노심외부 및 압력용기와는 달리 노심내부의 DORT입력모델링 시 직교좌표에 의한 노심 내부를 R- θ 좌표로 변환하려면 수작업으로 입력 자료를 작성하여야 한다. 따라서 모델에 대한 오차와 그에 따른 시간과 노력이 많이 필요하다. 또한 개발단계에 있는 원자로에 있어서는 노심 및 기타 원자로의 구조 및 구성 물질이 확정되어 있지 않아 설계사항이 변경될 때마다 이 작업을 반복 수행 하여야 한다. 본 연구에서는 정방형 격자노심뿐만 아니라 육방형 배열을 갖는 노심 및 기타 다른 구조를 갖는 노심에 대하여서도 자동적으로 모델링 하여 DORT입력자료로 사용할 수 있는 AUDORT코드를 개발하였다. AUDORT는 노심내부에 대한 선원항에 대한 구조 및 출력을 R- θ 좌표로 변환해주는 기능뿐만 아니라 DORT 수반행렬(Adjoint) 수송계산 결과로부터 노외계측기에 대한 반응도 함수인 반경방향의 Assembly Weighting Factor (R- θ) 및 축방향의 Shape Annealing Function (R-Z)를 계산하여 준다. 또한 DORT선원 항으로 사용되는 반경방향 출력분포를 한국원자력연구소에서 개발된 노심연소계산 코드인 MASTER[2]로부터 계산하여 나온 결과로부터 차폐해석 조건에 맞는 보수적인 반경방향 출력분포를 자동으로 생산해 주는 MAXRPD코드를 개발하였다. 이러한 프로그램들을 이용하여 원자로 압력용기에 대한 R- θ 좌표에 의한 반경방향 차폐해석을 할 수 있는 체계를 수립하였다. 또한 본 연구에서는 개발된 차폐해석체계를 이용하여 육방형 노심배열인 일체형원자로

의 압력용기에 대한 차폐해석을 수행하여 MCNP[3] 계산 결과와 비교 분석 하였다. 본 연구에 의해 수립된 R- θ 좌표에 의한 반경방향 원자로 압력용기의 차폐해석체계를 Fig. 1에 나타내었다.

해석체계 개발

MAXRPD코드 개발

원자로 압력용기에 대한 차폐해석 수행 시 선원항으로 사용되는 노심의 반경방향 출력 분포를 생산하기 위해서는 충분히 보수적인 조건을 갖춘 출력분포를 생산하여야 한다. 이를 위해서는 노심의 연소주기 동안 다양한 노심조건에서 노심의 외곽에 위치하는 핵연료 집합체에서 최대한 출력 분포를 낼 수 있는 경우의 값을 선택하여야 한다. 따라서 MAXRPD프로그램은 노심연소계산 코드인 MASTER[2]의 여러 조건의 노심계산 결과로부터 나온 출력파일들에서 직접 각각의 핵연료 집합체에 대한 출력 값에 대한 정보를 모두 저장한 후에 최대값을 선택하여 정규화된 각각의 반경방향 핵연료집합체 출력분포를 생산한다.

AUDORT코드 개발

AUDORT프로그램은 앞의 MAXRPD로 계산된 노심의 반경방향 출력분포와 노심내부의 기하학적인 정보를 사용하여 R- θ 좌표계에 의한 세부영역에서의 격자영역에 대한 영역구분 및 출력분포를 정의하여 DORT 입력형태로 출력하여 준다.

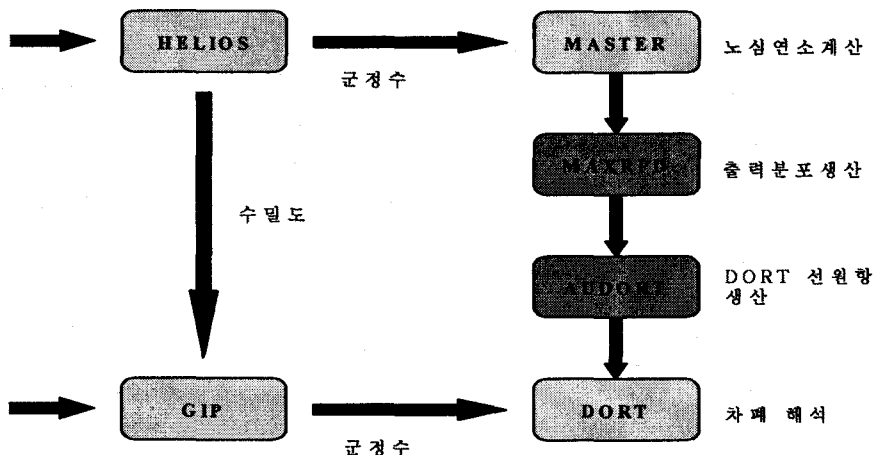


Fig. 1. Flowchart of Shielding Analysis System for Reactor Vessel.

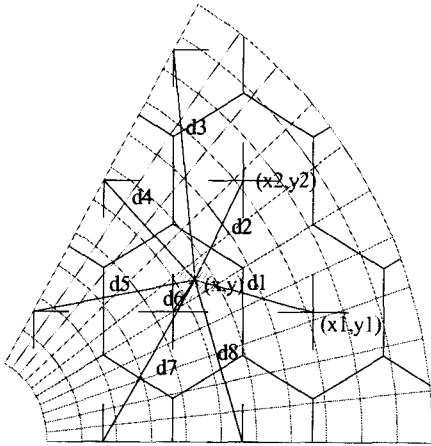


Fig. 2. Method for Region Definition of Mesh in AUDORT.

이 프로그램에서 격자의 영역 구분 및 출력분포를 정의하는 방법은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 모델링 하고자 하는 격자구역의 중심점에서 격자들레에 있는 각각의 핵연료집합체의 중심과의 거

리($d_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$)를 계산하여 가장 가까운 거리에 있는 핵연료집합체에 속해있는 것으로 지정한다. 이런 방법을 사용하면 노심에서의 핵연료집합체 배열에 상관없이 노심내부의 격자구역을 설정할 수 있으며 보다 쉽게 노심내부의 구성 물질에 대한 정보 및 출력분포를 노심 장전모형에 따라 사용된 핵연료집합체 별로 줄 수 있어 수작업 시 보다 시간을 절약할 수 있고 모델 작업의 시간 단축을 위해 외곽 핵연료집합체만 묘사하고 내측 핵연료집합체는 원자로 평균출력을 사용하여 균일하게 묘사하는 것보다 보다 현실적이고 정확한 노심상태를 묘사할 수 있다.

또한 개발된 AUDORT코드에는 DORT 수반행렬(Adjoint) 수송계산결과로부터 나온 자료를 이용하여 노외계측기의 반응함수인 반경방향의 Assembly Weighting Factor (R-θ계산) 및 축 방향의 Shape Annealing Function (R-Z계산)를 생산할 수 있다. 특히 반경방향의 Assembly Weighting Factor (R-θ계산)는 각각의 핵연료집합체의 노외계측기 반응도에 대한 상대적 중요도 분율로서 아래와 같이 정의된다.

$$AWF = \frac{R_n}{\sum_{n=1}^N R_n}$$

이 때 R_n 은 각각의 핵연료집합체에 대한 계측

기 반응도로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_n = \frac{\sum_{l=1}^L \Delta V_l R_l}{\sum_{l=1}^L \Delta V_l}$$

여기서 l = 각각의 핵연료집합체에 속한 격자의 총수이며, ΔV_l = 각 격자에 대한 면적이다. 따라서 기존의 방법에 의한 해석에 의한 각 격자가 속한 핵연료집합체를 정의하기 위해서는 선원형 모델링 작업과 마찬가지로 시간과 노력이 많이 소요되는 수작업으로 계산하여야 한다. 이를 DORT출력과일로부터 각각의 격자에 대한 결과값을 앞서 설명한 구역정의 방법을 역으로 이용하여 자동으로 계산한다.

검증계산

대상노심

개발된 R-θ좌표계에 의한 원자로압력용기의 차폐해석체계를 사용하여 일체형원자로에 대하여 차폐해석을 수행하고 이를 MCNP계산을 통하여 검증, 평가하였다. 대상노심은 열출력이 65.5Mwt이고, 핵연료집합체 295개가 육방형으로 배열되어 있으며 핵연료집합체 선출력 밀도는 약 62 W/l이다. 또한 일체형원자로는 무봉산으로 운전을 하며 원자로의 출력제어는 냉각재 온도 및 제어봉만을 사용하고 있다. 일체형원자로의 구성 및 구조는 Fig. 3과 같다. 원자로 압력용기의 차폐해석 계산 시 원자로의 수명은 90%이용률을 가지고 30년 동안 가동하는 것으로 가정하였다.

선원형 계산

앞서 설명한 차폐해석 조건에 맞는 노심의 출력분포를 생산하기 위해서는 여러 조건에서 노심

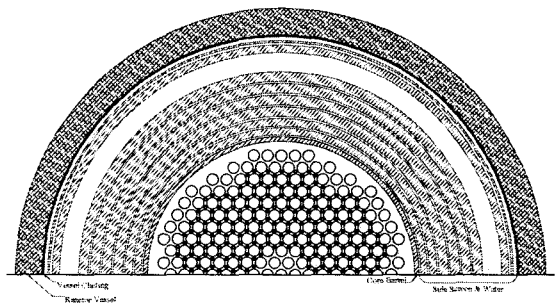


Fig. 3. Structure of Integral Reactor.

연소계산을 수행하여야 한다. 무봉산 노심인 일체형원자로는 제어봉의 삽입 조건이 핵연료집합체별 출력분포를 좌우하는 가장 중요한 변수가 된다. 이를 위해 정상 제어봉 삽입 상태에서의 연소계산뿐만 아니라 최대, 최소 제어봉 삽입 상태에서의 연소계산을 수행하였다. 이러한 계산 결과들로부터 개발된 MAXRPD를 사용하여 차폐해석조건에 맞는 반경방향 핵연료집합체별 출력분포를 생산하였다. 하지만 검증계산에 사용되는 MCNP 모델의 노심상태는 이러한 조건을 전부 수용하여 계산할 수는 없다. 따라서 MCNP모델에 사용된 전제어봉 인출상태의 노심에 대한 차폐해석을 수행하기 위해 위의 MAXRPD를 사용하지 않고 전제어봉 인출상태의 연소계산으로부터 나온 반경방향 출력분포를 이용하였다. Fig 4에는 개발된 차폐해석 체계에 의한 반경방향 출력분포와 전제어봉 인출상태의 출력분포를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 MAXRPD로 생산된 출력분포가 노심의곽에서 높은 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

수송 계산

핵연료집합체가 장전되어 있는 노심의 모델링은 매우 복잡하여 노심 전체를 균질화된 노심으로 가정하는 방법을 사용하여 왔으며 이로 인한 계산결과의 오차를 유발하였다. 그러나 본 연구에서 개발된 해석체계에서는 핵연료집합체별 입력이 보다 쉽게 가능하여 각각의 핵연료집합체별 수밀도를 사용하여 보다 사실적인 노심에 대한 모델을 사용하여 차폐해석을 수행하게 되었다. 이를 위해 노심내부의 핵연료집합체에 대한 수밀도

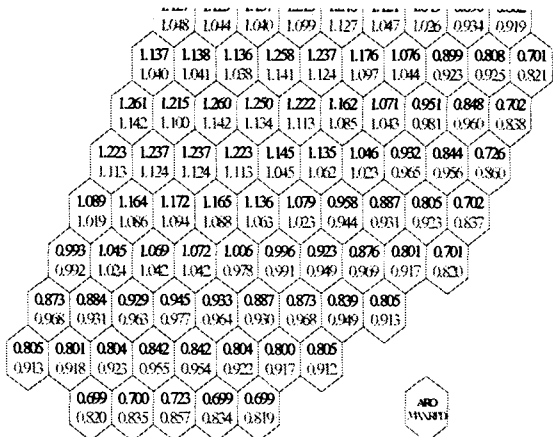


Fig. 4. Radial Power Distribution obtained from MAXRPD and MASTER ARO Condition.

는, 여러 가지 기하학적 구조에 대한 2차원 균정수를 생산할 수 있는 HELIOS[4]코드를 사용하여 자동으로 생산하였다. 또한 DORT의 컴퓨터 수행 시간을 절약하기 위해 DORT에 사용된 균정수를 GIP[5]코드를 사용하여 생산하였다. 이때 사용된 단면적 자료는 47군 중성자 및 20군 감마 단면적으로 요약되어 있는 DLC-185/ BUGLE-96[6]을 사용하였다. 이 단면적 자료는 에너지 구간이 $1.0 \times 10^{-5} \text{eV}$ 부터 $1.7 \times 10^7 \text{eV}$ 까지 구성되어 있으며 차폐계산에 사용되는 중성자 단면적에 대한 자세한 균별 에너지 구간은 Table 1과 같다.

원자로 압력용기 중성자 조사량 평가를 위하여서는 1MeV이상의 에너지에 대한 중성자 단면적만이 필요하므로 Table 1에서 보는 바와 같이 1~18군 및 에너지 구간이 $0.8209 \text{ MeV} < E < 1.0026 \text{ MeV}$ 로 되어있는 19군에 대하여 아래와 같이 1MeV이상에 대한 분율을 구하여 중성자 단면적에 곱하여 준다.

Table 1. Neutron Group Energy Boundaries for BUGLE-96.

Group	Upper Energy(eV)	Group	Upper Energy(eV)
1	1.7332×10^7	25	2.9721×10^5
2	1.4191×10^7	26	1.8316×10^5
3	1.2214×10^7	27	1.1109×10^5
4	1.0000×10^7	28	6.7379×10^4
5	8.6071×10^6	29	4.0868×10^4
6	7.4082×10^6	30	3.1828×10^4
7	6.0653×10^6	31	2.6058×10^4
8	4.9659×10^6	32	2.4176×10^4
9	3.6788×10^6	33	2.1875×10^4
10	3.0119×10^6	34	1.5034×10^4
11	2.7253×10^6	35	7.1017×10^3
12	2.4660×10^6	36	3.3546×10^3
13	2.3653×10^6	37	1.5846×10^3
14	2.3457×10^6	38	4.5400×10^2
15	2.2313×10^6	39	2.1445×10^2
16	1.9205×10^6	40	1.0130×10^2
17	1.6530×10^6	41	3.7266×10^1
18	1.3534×10^6	42	1.0677×10^1
19	1.0026×10^6	43	5.0435×10^0
20	8.2085×10^5	44	1.8554×10^0
21	7.4274×10^5	45	8.7643×10^{-1}
22	6.0810×10^5	46	4.1399×10^{-1}
23	4.9787×10^5	47	1.0000×10^{-1}
24	3.6883×10^5		1.0000×10^{-5}

이때 MCNP에서 Tally에 의하여 출력된 결과는 핵연료 영역에서 핵분열에 의해 특정한 에너지를 가지고 발생하는 단일 중성자가 특정위치에서 단위 면적당 보일 확률(cm^{-2})이므로 실제 중성자속($\text{neutrons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$)을 예측하려면 특정 출력에 대하여 단위 시간당 총 중성자수로 표현된 중성자속 정규화 상수를 곱하여야 한다. 출력에 따른 중성자속 정규화 상수는 다음과 같다.

$$C.F. = 3.467 \times 10^{10} \left(\frac{\text{fission}}{W \cdot \text{Sec}} \right) \times \text{Power}(W) \times \bar{\nu}$$

이때 $\bar{\nu}$ 값은 DORT계산 시 사용되었던 2.6445를 사용하였다.

결과 및 결론

개발된 R- θ 좌표계에 의한 원자로압력용기의 차폐해석체계의 결과 및 MCNP계산 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 3D-MCNP는 3차원 MCNP의 계산 결과이고, DORT(Design)은 개발된 차폐해석 체계에 따라 계산된 결과이고, DORT(ARO)는 MAXRPD프로그램의 결과를 사용하지 않고 MCNP노심조건을 사용한 계산결과이다. 그림에서 보면 반경방향 중성자 조사량 분포의 모양이 서로 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 주로 입력 자료로 주어진 선원항에 대한 정보에 기인하는 것으로 개발된 차폐해석체계의 AUDORT를 이용하여 생산된 선원항 모델에 대한 입력 자료가 정확히 묘사된 것을 알 수가 있다. 또한 그림에서 보면 전반적으로 DORT계산 결과가 MCNP계산결과보다 보수적으로 평가되는 것을 볼 수 있다. 이는 개발된 해석체계와 무관한 기존의 DORT를 이용한 설계체계가 더욱 보수적으로 해석되는 것을 알 수가 있으며 기존의 설계에 사용되었던 해석방법이 유효하다는 것을 보여준다.

또한 새로이 개발된 해석체계의 MAXRPD를 이용한 계산결과가 MCNP 검증계산 조건인 ARO 상태의 계산결과보다 다소 크게 보여주고 있다. 이는 Fig. 4에서와 마찬가지로 외곽의 핵연료집합체에서의 출력이 높아서 나타나는 결과이며 이는 좀 더 보수성을 가지고 설계를 수행할 수 있어 MAXRPD로 생산된 출력분포가 안전 설계 측면에서 유효한 것을 알 수 있다.

결과적으로 개발된 차폐해석체계를 이용하면 그 동안 수작업으로 작성하였던 노심내부에 대한

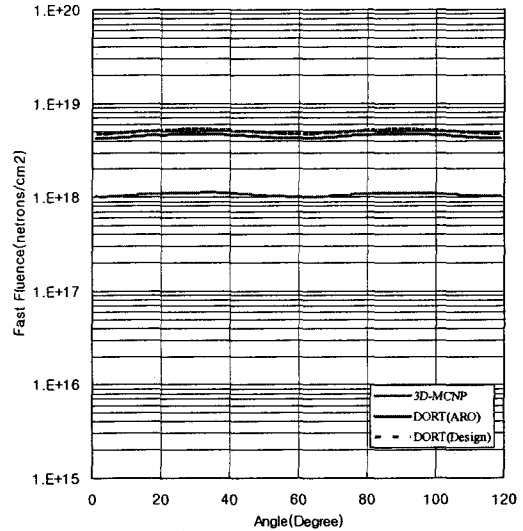


Fig. 7. Fast Fluence Distribution of Reactor Vessel for Integral Reactor.

모델에 대한 오차를 줄일 수 있으며 이에 소요되는 시간 및 노력을 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부가 수행하고 있는 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. "RSICC Computer Code Collection-DOORS3.2," CCC-650, ORNL(1998)
2. 조진영, "MASTER 3.0 USER'S MANUAL," KAERI/UM-8/2004, 한국원자력연구소(2004)
3. "RSICC Computer Code Collection-MCNP4C2," CCC-701, ORNL(2001)
4. Teodosi Simeonov and Lars Moberg, "Release notes-HELIOS System version 1.8," SSP-03/221, Studsvik Scandpower(2003)
5. W.A. Rhoades, "The GIP program for preparation of group-organized cross-section libraries," ORNL(1978)
6. "Rsicc data library collection bugle-96," DLC-185, ORNL(1996)
7. "핵자료 체제 구축 기반 연구-MCNP" CD-III & CD-IV, 핵자료평가팀, 한국원자력연구소(2002)